第27卷 第1期 腐蚀科学与防护技术 Vol.27 No.1
2015年1月 CORROSION SCIENCE AND PROTECTION TECHNOLOGY Jan. 2015

钨铝合金在不同NaCl溶液中的电化学腐蚀行为研究

吴茂永 田继强 曹立新 高荣杰 苏 革 柳 伟
中国海洋大学材料科学与工程研究院 青岛 266100

摘要：采用极化曲线、电化学阻抗谱等电化学方法研究了钨铝合金在不同温度、盐度及pH值的NaCl溶液中的腐蚀行为。实验结果表明：钨铝合金的腐蚀速率随盐度的增加而增加；耐腐蚀性能随温度的升高而下降；在中性NaCl溶液中最耐腐蚀，且酸性越大，腐蚀速率越快。

关键词：钨铝合金 NaCl溶液 腐蚀 阻抗图谱 极化曲线
中图分类号：TG172 **文献标识码**：A **文章编号**：1002-6495(2015)01-0025-06

Electrochemical Corrosion Behavior of Tungsten-aluminum Alloy in NaCl Solutions

WU Maoyong, TIAN Jiqiang, CAO Lixin, GAO Rongjie, SU Ge, LIU Wei

Institute of Materials Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

Abstract: The corrosion behavior of tungsten-aluminum alloy in NaCl solutions was studied by electrochemical impendence spectroscopy (EIS) and potentiodynamic scanning (PDS). The results show that the corrosion rate of tungsten-aluminum alloy increases with the increase of salinity of the solutions and its corrosion resistance drops along with the increase of temperature. The corrosion rate of the alloy goes up with the increase of acidity of solutions, in other words, the alloy shows better anti corrosion performance in neutral NaCl solution.

Key words: tungsten-aluminum alloy, NaCl solution, corrosion, electrochemical impendence spectroscopy (EIS), potentiodynamic scanning (PDS)

1 前言

钨铝合金是一种特种高硬度、高耐磨、高强度轻质合金材料，现在已广泛应用于航天、医疗等领域[1-3]。作为一种具有优良特性的新型结构材料，未来有希望应用于海洋开发中。海洋环境十分复杂，海水中存在大量的氯化物以及硫酸盐，同时其溶解氧浓度很大，pH值达到7.2~8.5，对材料具有很强的腐蚀性，而腐蚀所引起的危害巨大，这会破坏材料的结构，降低材料使用寿命，造成安全隐患，增加经济成本[4,5]，因此了解钨铝合金在海水中的腐蚀行为是实现其海洋应用的重要前提。目前有关钨铝合金在模拟海水腐蚀方面的研究较少，而对于其他种类铝合金腐蚀方面的报道相对较多。Hosni等[6]研究了AA5083和AA1100两种铝合金在不同温度的海水中腐蚀情况，认为铝合金腐蚀类型为点蚀，随着温度上升，腐蚀速率加快。Bazzi等[7]对3003和6063两种铝合金在0.5 mol/L的NaCl溶液中的腐蚀行为进行了研究，认为3003铝合金随温度升高腐蚀速率出现先升高后降低的规律，而6063铝合金的腐蚀速率始终与温度变化成正相关关系。

本文采用极化曲线、电化学阻抗图谱等电化学手段研究了钨铝合金在不同NaCl溶液中电化学腐

定稿日期：2014-04-03
基金项目：国家自然科学基金项目(51172218)和青岛市科技发展计划项目(12-1-4-1-(2)-jch)资助
作者简介：吴茂永，男，1990年生，硕士生
通讯作者：曹立新，E-mail：caolixin@ouc.edu.cn，研究方向为材料物理化学，功能材料
DOI：10.11903/1002.6495.2014.094

蚀行为，对该种材料在海洋应用具有一定参考价值。

2 实验方法

钨铝合金试样的成分 (质量分数，%) 为：Cu 3，Mg 3，W 1.5，Al 92.5，将1 cm×1 cm×0.3 cm的钨铝合金片试样，用细铜导线焊接固定，留出1 cm×1 cm的一个面作为工作面，其它面均用环氧树脂封闭。置于室温下干燥后逐级打磨至2000#砂纸，然后使用金刚石抛光膏w2.5进行抛光处理。再经NaOH溶液 (70 g/L)、丙酮、HNO_3溶液、纯净水清洗等步骤，干燥后，电极制备完毕。

使用的测试溶液为室温下配置的质量分数为3.5%、pH值为7的NaCl溶液，并采用单因素变量法考察了浓度、温度和pH值对钨铝合金腐蚀行为的影响。考察浓度的影响时，分别配置质量分数为2.0%，3.5%，5.0%和6.5%的NaCl溶液；考察温度的影响时，0 ℃通过将装有测试电极体系的烧杯置于冰水浴中来实现，而其他的温度条件 (25，40和60 ℃) 则通过设置水浴锅的温度参数来实现；考察pH值的影响时，用HCl或NaOH溶液将3.5%NaCl溶液的pH值调至3、5、7、9、11。

极化曲线和电化学阻抗谱测试在AutolabPgstat302N电化学工作站上进行。测试时采用传统的三电极体系，工作电极为钨铝合金电极，辅助电极为铂片，参比电极为饱和甘汞电极 (SCE)。极化曲线扫描的范围为相对于工作电极的开路电位−600~600 mV，扫描速率为1 mV/S；电化学阻抗谱的测量是在开路电位 (OCP) 的情况下进行的，其中激励信号为幅值为10 mV的正弦波，扫描频率范围为10 mHz~10 kHz。数据的拟合使用的是Nova1.6软件。

3 结果与讨论

3.1 不同盐度下的极化曲线、电化学阻抗图谱及分析

图1为钨铝合金在不同质量分数NaCl溶液中

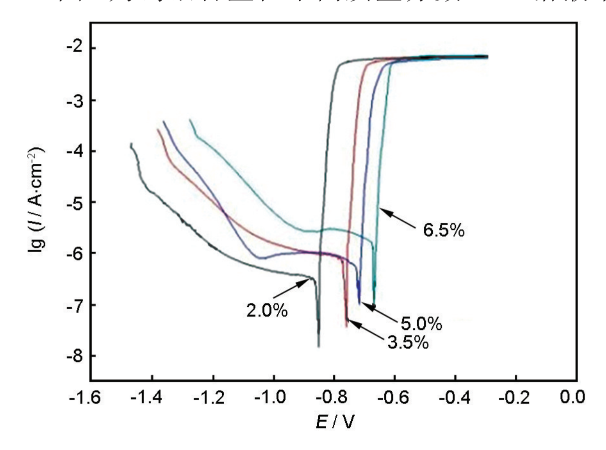


图1 钨铝合金在不同质量分数NaCl溶液中的极化曲线

Fig.1 Potentiodynamic polarization curves for tungsten-aluminum alloy in diffident salinity NaCl solution

的极化曲线，各条曲线形状相似，表明在不同质量分数的NaCl溶液中，钨铝合金在浸泡初期有着相同的腐蚀过程。阳极极化反应为 $Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$，反应进行很快，电流密度很快达到极限，阴极极化反应为 $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$，属于氧扩散控制，当电位负移到一定程度，氢析出反应开始[8]。另外，图中的极化曲线没有出现明显的钝化区，表明在不同的溶液中该铝合金均未发生明显的钝化现象。随着Cl^-浓度的升高，腐蚀电位逐渐升高，由−856 mV上升至−671 mV；腐蚀电流密度也有所增加，由0.316 μA/cm^{2}增加至1.778 μA/cm^2，电流密度增大了一个数量级之多。

经计算在2.0%，3.5%，5.0%和6.5%NaCl溶液中，钨铝合金的年腐蚀速率分别为0.00344，0.00686，0.00865和0.0194 mm/a。

Cl^-对铝合金的侵蚀作用主要表现为4个方面[9,10]：(1) Cl^-对氧化膜具有渗透破坏作用，对胶状保护膜具有解胶破坏作用；(2) Cl^-很容易吸附在金属表面，因此阻碍了钝化过程；(3) Cl^-吸附在金属表面上形成强电场，加快了金属离子的溶出；(4) Cl^-与金属可生成氯的配合物，加速金属溶解。

Al的化学性质很活泼，经过抛光处理的铝合金表面也很快形成了一层氧化膜，但在空气中形成的这种氧化膜较薄且不致密。一般金属氧化膜的表面都含有羟基，当pH值在等电点以下时，表面倾向于吸附正电荷。对于铝合金的表面，有如下反应[11]：

$$Al_{oxide}OH + H^+ \rightarrow Al_{oxide}OH_2^+ \quad (1)$$

由于Cl^-活化作用较强，离子半径小，穿透力强，会在铝合金表面缺陷处或者孔隙处发生十分明显的吸附现象，容易通过氧化性保护膜内极小的孔隙，直接与金属发生反应，造成氧化膜破坏以及Al的溶解。反应为：

$$Al_{oxide}OH_2^+ + nCl^- \rightarrow Al_{oxide}OH_2^+Cl_n^{-n} \quad (2)$$

$$Al_{oxide}OH_2^+Cl_n^{-n} \rightarrow Al(nCl^-)_{oxide}OH_2^+ \quad (3)$$

$$Al(nCl^-)_{oxide}OH_2^+ \rightarrow Al^+(nCl^-)_{oxide}OH_2^+ + e^- \quad (4)$$

$$Al + (nCl^-)_{oxide}OH_2^+ \rightarrow Al^{++}(nCl^-)_{oxide}OH_2^+ + e^- \quad (5)$$

$$Al^{++}(nCl^-)_{oxide}OH_2^+ \rightarrow Al^{+++}(mCl^-)_{oxide}OH_2^+ [(n-m)\,Cl^-] + e^- \quad (6)$$

根据电化学腐蚀动力学，随着溶液的盐度增大，Cl^-浓度增大，活性氯的浓度随之增加，使得反应体系反应更加容易，电子交换速度加快，从而导致合金基体表面更易遭受到Cl^-的侵蚀，腐蚀电流密度增大，其对电极产生的破坏作用越强，材料的耐腐蚀性能严重下降[12]。

图2为钨铝合金在不同浓度的NaCl溶液中开路电路下的电化学阻抗行为图谱。可以看出所有阻

抗谱上均只存在一个容抗弧。这表明在不同盐度的溶液中，钨铝合金的初始反应过程是相似的，都表现为金属的溶解过程，即金属表面与溶液形成的双电层发生的反应过程。从图2可以看出，随着盐度的增加，容抗弧逐渐收缩，极化电阻也不断减小。利用图2中小图的等效电路图[13]来模拟电极过程，其中R_s代表溶液电阻，R_1代表极化电阻，Q代表常相位角元件。可以看到拟合效果很好，表1列出了阻抗拟合的结果，其中C值为Q的电容值，n值为Q的弥散指数。

由表1拟合结果可以得知，随着盐度的增加，容抗的弥散指数由0.98降至0.89，即盐度较低时，电化学过程类似于纯电容行为，这可能是基体缓慢溶解的过程，此时表面结构较为均一；随着盐度增加，Cl^-的破坏作用增加，容易在表面形成小孔，金属基体的溶解过程逐渐增大，产生不均匀的表面，致使弥散作用增大。电容值随盐度的增加逐渐增大，可能与小孔形成，双电层相对面积增大有关[14]。随盐度增加，离子交换速度加快，极化电阻也因此减小。所得到的结果与极化测试得到的结果有良好的一致性。

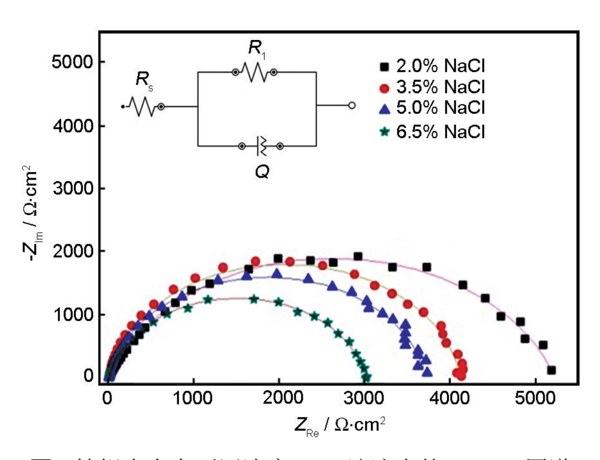


图2 钨铝合金在不同浓度NaCl溶液中的Nyquist图谱

Fig.2 Effect of salinity on impedance response of tungsten-aluminum alloy in NaCl solution at open circuit potential (OCP)

表1 钨铝合金在不同浓度NaCl溶液中的电化学阻抗谱拟合结果

Table 1 Optimum fit parameters for experiments in Fig.2

Mass fraction	R_s Ω·cm²	R_1 kΩ·cm²	C μF·cm²	n
2.0%	12.7	5.21	27.8	0.985
3.5%	9.96	4.11	32.2	0.951
5.0%	5.19	3.71	34.9	0.905
6.5%	11.2	2.98	38.3	0.892

3.2 不同温度下的极化曲线、电化学阻抗图谱及分析拟合

从图3中可以看出，在不同温度下的极化曲线形状相似，因此在不同温度的NaCl溶液中，钨铝合金浸泡初期的腐蚀类型相同。阳极极化反应为$Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$，阴极极化反应为$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$。在阳极极化区，随着电位的增大，未出现明显钝化区，所以在不同温度的溶液中，钨铝合金均未发生钝化现象[15]。

随着温度的升高，腐蚀电位逐渐升高，由在0 ℃ NaCl溶液中的−764 mV正移至60 ℃ NaCl溶液中−654 mV，表明随着溶液温度升高，钨铝合金越容易发生腐蚀。

从图3还可以看出，随着温度的升高，腐蚀电流密度也呈增加的趋势。由表2可看出，腐蚀电流密度从在0 ℃ NaCl溶液中的0.783 μA/cm²增大到60 ℃NaCl溶液中12.59 μA/cm²，电流密度增大超过一个数量级。

根据电化学腐蚀动力学，温度升高，铝合金工作电极表面Cl^-的扩散速度增大，反应速率常数k增大，

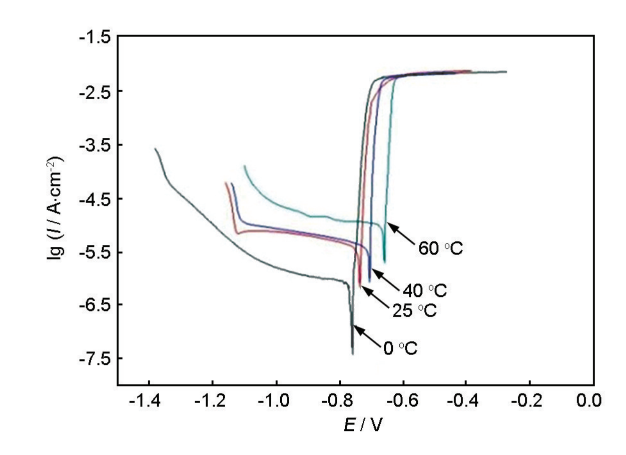


图3 钨铝合金在不同温度3.5%NaCl溶液中的极化曲线

Fig.3 Potentiodynamic polarization curves for tungsten-aluminum alloy in 3.5% NaCl solution at different temperature

表2 钨铝合金在不同温度3.5%NaCl溶液中的极化曲线拟合结果

Table 2 Optimum fit parameters for the experiments in Fig.3

Temperature ℃	I_{corr} μA·cm⁻²	E_{corr} mV	Corrosion rate mm·a⁻¹
0	0.783	−764	0.00853
25	3.548	−738	0.0387
40	3.981	−703	0.0434
60	12.59	−654	0.137

反应加快，电子交换速度越快，Cl^-更加容易通过铝合金表面的缺陷与铝合金的表面发生点蚀，点蚀加快了铝合金的溶解速度，腐蚀电流密度就会变大，从而使铝合金的耐腐蚀性能下降。根据拟合值得到的年腐蚀速率为0.008~0.137 mm/a，变化范围较大，可见温度的升高对腐蚀速率的影响非常明显。

图4为钨铝合金在不同温度的3.5%NaCl溶液(pH值为7) 中的开路电路下的电化学阻抗行为。可以看出阻抗谱上只存在一个容抗弧，对应着金属表面的溶解过程，即电极表面与溶液形成的双电层反应过程。采用图4中小图电路来模拟整个电极过程。表3中列出了阻抗拟合的结果，可以看到拟合效果很好。其中*C*为*Q*的电容值大小，*n*为*Q*的弥散指数。

从图4及表3可以看出，随着温度的增加，容抗弧逐渐收缩，极化电阻也不断减小，容抗的弥散指数由0.92降至0.88，这可能是由于温度升高，点蚀程度增加，表面变得不均一，弥散效应增大。极化电阻降低的幅度较大，每升高10 ℃，降低约1000 Ω·cm²；较之盐度的对腐蚀影响更为明显。电容值随温度的增加而逐渐增大，可能与点蚀形成后增加了双电层中金属表面的面积相关，面积越大，电容值越大[16]。

温度增加，体系的活化能增大，离子的吸附过程、离子交换过程速度都加快，因此会使电荷转移容易，表现为极化阻抗值变小，在宏观上表现为腐蚀过程的加快。所得到的结果与极化测试结果一致。

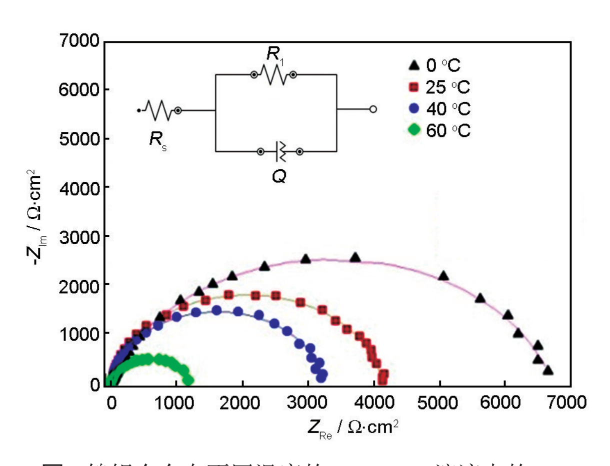


图4 钨铝合金在不同温度的3.5%NaCl溶液中的Nyquist图谱

Fig.4 Effect of temperature on impedance response of tungsten-aluminum alloy in 3.5%NaCl solution at OCP

表3 钨铝合金在不同温度3.5%NaCl溶液中的电化学阻抗谱拟合结果

Table 3 Optimum fit parameters for experiments in Fig.5 using the model in Fig.4

Temperature ℃	R_s Ω·cm²	R_1 kΩ·cm²	C μF·cm²	n
0	11.8	6.7	14.1	0.923
25	9.96	4.11	23.2	0.915
40	8.73	3.2	32.6	0.909
60	4.74	1.18	48.6	0.876

3.3 不同pH值下的极化曲线、电化学阻抗图谱及分析

图5给出的是钨铝合金在不同pH值的NaCl溶液中的极化曲线，与ZL102和LF6铝合金在不同pH值的3%NaCl溶液中的极化曲线相似，从拟合数据看钨铝合金的腐蚀速率在碱性条件下远远高于ZL102和LF6铝合金，在中性条件下高于ZL102铝合金、低于LF6铝合金[17]。

从图5中可以看出，在中性及酸性条件下的极化曲线形状相似，因此在中性及酸性条件下的NaCl溶液中，浸泡初期的钨铝合金腐蚀反应过程相似。阳极反应为简单的溶解过程 $Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$，并且在阳极极化过程中未出现明显钝化区，所以在中性及酸性条件下的溶液中，钨铝合金未发生钝化现象[18]。

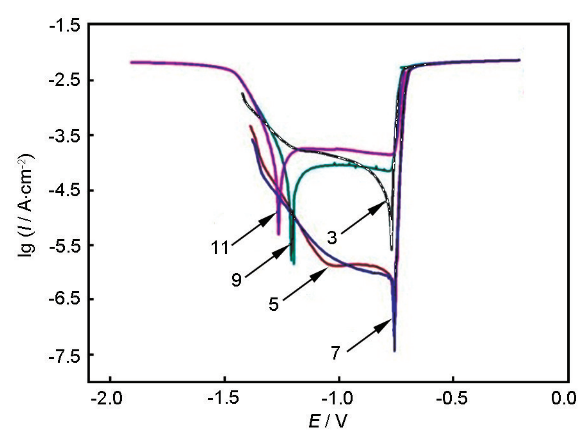


图5 钨铝合金在不同pH值的3.5%NaCl溶液中的极化曲线

Fig.5 Potentiodynamic polarization curves for tungsten-aluminum alloy in 3.5%NaCl solution of different pH

表4 钨铝合金在不同pH值的3.5%NaCl溶液中的极化曲线拟合结果

Table 4 Optimum fit parameters for the experiments in Fig.5

pH	I_{corr} μA·cm⁻²	E_{corr} mV	Corrosion rate mm·a⁻¹
3	70.79	−752	0.771
5	0.732	−753	0.00798
7	0.707	−757	0.00770
9	31.62	−1225	0.345
11	70.32	−1250	0.766

酸性条件下，在pH值为3和5的溶液中相比：虽然前者的腐蚀电位略低于pH值为5的腐蚀电位，但这只是材料腐蚀的热力学趋势的大小。而腐蚀电流是由材料的溶解所造成的，评价材料耐蚀能力时，腐蚀电流是重要的参数，腐蚀电流越小，材料的耐蚀性能越好。前者的腐蚀电流密度远远大于后者，说明在前一种条件下，腐蚀速率远远快于后一种，即酸性增加，腐蚀加快。因为在酸性条件下，阴极反应为 $O_2+4H^++4e^-\rightarrow 2H_2O$，$H^+$浓度增加，阴极反应速度加快。

在碱性条件下两条极化曲线形状相似，且异于中性及酸性条件下的形状。随着pH值升高，腐蚀电位负移，腐蚀电流密度增大，腐蚀加快。在碱性条件下，开始时的阳极过程为 $Al+4OH^-\rightarrow Al(OH)_4^-+3e^-$，随着电位逐渐正移，电流密度逐渐增大，随后电极反应受扩散控制，电流密度达到极限，电位继续正移达到−750 mV左右，又一阳极过程 $Al\rightarrow Al^{3+}+3e^-$ 开始，反应很快，电流密度急剧增加，很快达到极限[19]。

从整体来看，钨铝合金在中性条件下腐蚀速率最低；酸性条件下，随着酸性加强，腐蚀速率加快，pH值下降后，H^+浓度增加，阴极反应速度加快，Al的溶解速度增加；碱性条件下，随着碱性加强，腐蚀速率加快，pH值增加，OH^-浓度增大，Al的溶解速度也增加。

图6是钨铝合金在不同pH值的3.5%NaCl溶液中的阻抗图谱，采用图7的3个图对其来拟合。在pH值为3时，钨铝合金表现为高频容抗、低频感抗，分别对应于电极表面溶解、不稳定点蚀过程。曹楚南[20,21]等认为电感对应于表面不稳定点蚀的形成。

pH值为5和7时，钨铝合金的电化学行为表现为中高频仅有的一个容抗弧，对应于金属基体与溶液形成的双电层行为，是金属基体溶解的过程。

pH值为9和11时，腐蚀行为表现为两个容抗弧，高频下的容抗弧对应于产生的氧化膜与溶液之间的双电层行为，在碱性条件下的阳极过程为 $Al+4OH^-=Al(OH)_4^-+3e^-$，形成的 $Al(OH)_4^-$ 进一步形成 $Al(OH)_3$ 覆盖在阳极表面，而中低频的容抗弧对应于氧化膜层下的金属溶解过程。从模拟值还可看出，存在氧化膜时，其介电性能电极的电容值增

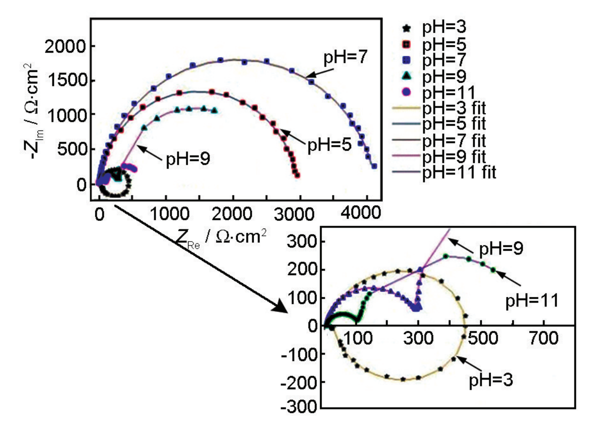


图6 钨铝合金在不同pH值的3.5%NaCl溶液中的Nyquist图谱

Fig.6 Effect of pH values on the impedance response of tungsten-aluminum alloy in 3.5% NaCl solution at OCP

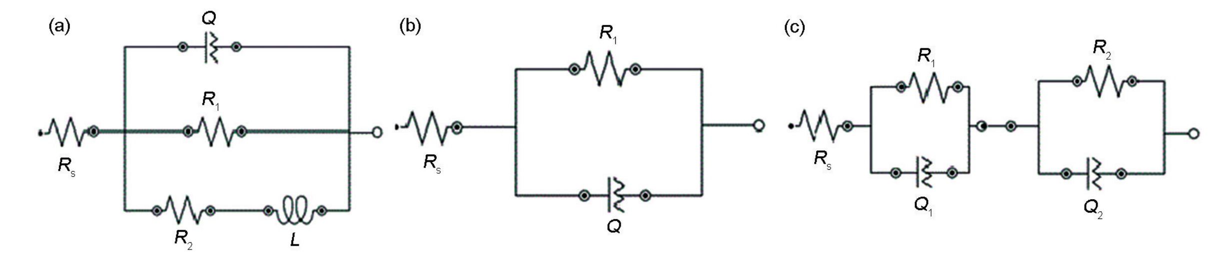


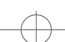
图7 钨铝合金在不同pH值3.5%NaCl溶液中的腐蚀对应的3种不同等效电路

Fig.7 Three kinds of equivalent circuit models used to fit the experimental data of W-Al alloy in NaCl solution of different pH

表5 钨铝合金在不同pH值3.5%NaCl溶液中的电化学阻抗谱拟合结果

Table 5 Optimum fit parameters for the experiments in Fig.6 using the model in Fig.7

pH	Circuit diagram	R_s / Ω·cm²	R_1 / Ω·cm²	R_2 / Ω·cm²	C_1 / μF·cm²	n_1	C_2 / μF·cm²	n_2
3	Fig.7a	6.62	570	20.6	67.5	0.844	18.9	−0.87
5	Fig.7b	7.69	2953	---	17.8	0.937	---	---
7	Fig.7b	9.96	4.11	---	13.2	0.915	---	---
9	Fig.7c	5.83	280	2293	47.3	0.972	3860	0.970
11	Fig.7c	7.7	98.3	550	80.3	0.907	6460	0.944



大[22]。

4 结论

(1) 在不同盐度下，腐蚀过程是相似的，表现为金属阳极的活性溶解，自腐蚀电位随盐度增加正移，自腐蚀电流密度随盐度增加而增大。电化学阻抗图谱中，只存在一个电容抗，极化电阻随盐度增加减小。

(2) 在不同温度下，腐蚀过程为铝阳极的溶解，随着温度升高自腐蚀电流增大，腐蚀加快。

(3) 在强酸溶液中，出现明显感抗弧，表明不稳定点蚀形成；酸性越强，腐蚀速率越快；碱性溶液中的电化学行为表现为两个容抗弧，碱性越强，腐蚀速率越快。钨铝合金的腐蚀速率在碱性条件下远远高于ZL102和LF6铝合金，在中性条件下高于ZL102铝合金、低于LF6铝合金。

参考文献

[1] 中科院长春应用化学研究所. 高性能钨铝合金增强铝基材料 [J]. 技术与市场, 2009, 16(11): 99

[2] Qiao Z H, Ma X F, Zhao W, et al. A novel (W-Al)-C-Co composite cemented carbide prepared by mechanical alloying and hot-pressing sintering [J]. Int. J. Refractory Met. Hard Mater., 2008, 26: 251

[3] Qiao Z H, Wang H J, Ma X F, et al. Nanostructured bulk novel hard material with "rounded" grains obtained by nanocrystalline "rounded" ($W_{0.5}Al_{0.5}$) C powders [J]. Mater. Sci. Eng., 2008, A496: 507

[4] 张敏. 金属腐蚀监测技术 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2007, 19(5): 354

[5] 汪俊英, 孔小东. 两种铝合金在3%NaCl溶液中的腐蚀特性 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2011, 23(1): 41

[6] Hosni E, El-Houd A, El-Shawesh F. A study on the corrosion behavior of aluminum alloys in seawater [J]. Mater. Design, 2008, 29(4): 801

[7] Bazzi L, Salghi R, Alami Z E, et al. Comparative study of corrosion resistance for 6063 and 3003 aluminium alloys in chloride medium [J]. Rev. Metall. Cahiers D. Inform. Tech., 2003, 100(12): 1227

[8] Zaid B, Saidi D, Benzaid A. et al. Effects of pH and chloride concentration on pitting corrosion of AA6061 aluminum alloy [J]. Corros. Sci., 2008, 50(7): 1841

[9] 李鹏.飞机铝合金结构件的腐蚀机理与控制 [J]. 全面腐蚀控制, 2006, 20(2): 36

[10] 张晋, 张涛, 邵亚薇等. 5083和6061铝合金缝隙腐蚀行为的研究 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2014, 26(2): 125

[11] 丁红燕. 铝合金和钛合金在雨水/海水环境下的腐蚀与磨损交互作用研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007

[12] Szklarska-Smialowska Z. Pitting corrosion of aluminum [J]. Corros. Sci., 1999, 41(9): 1744

[13] Carroll W, Breslin C. Stability of passive films formed on aluminum in aqueous halide solutions [J]. Br. Corros. J., 1991, 26(4): 256

[14] McCafferty E. Sequence of steps in the pitting of aluminum by chloride ions [J]. Corros. Sci., 2003, 45(7): 1421

[15] 孙霜青, 赵予兵, 郑弃非等. 包铝的7075和2024合金在海洋大气环境中的点蚀演化机制 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2012, 32(3): 195

[16] 张鉴清. 电化学测试技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010

[17] 马毅斌, 李宁, 黎德育等. Mg-14Li-1Al-0.1Ce合金在卤素溶液(Na*X*, *X*=F, Cl, Br和I) 中腐蚀行为的研究 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2011, 23(6): 467

[18] 张晓云, 孙志华, 刘明辉等. 环境对高强度铝合金应力腐蚀行为的影响 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2007, 27(6): 354

[19] MaCdonald D D, Song H, Makela K, et al. Corrosion potential measurements on type 304 SS and alloy 182 in simulated BWR environments [J]. Corrosion, 1993, 49(1): 8

[20] 曹楚南, 张鉴清. 电化学阻抗谱导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2004

[21] 汪俊英, 孔小东, 刘信等. 铝合金在NaCl溶液中的电化学腐蚀行为 [J]. 装备环境工程, 2010, 7(3): 38

[22] 王刚, 金平, 谭晓明等. 海洋环境下7B04铝合金腐蚀损伤演化规律研究 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2012, 32(4): 338

